

令和元年6月26日現在

機関番号：62616

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15H02073

研究課題名(和文) 高感度2ミリ帯分光観測による隠された爆発的星生成と巨大ブラックホールの研究

研究課題名(英文) Investigating Dusty Starburst and Super-Massive Black Hole with 2 mm receiver on LMT

研究代表者

川邊 良平 (Kawabe, Ryohei)

国立天文台・電波研究部・教授

研究者番号：10195141

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 33,520,000円

研究成果の概要(和文)：ALMA Band-4受信機をベースにした超高感度の2mm受信機と、広帯域で高分散の分光計を開発して、メキシコの4600mサイトにあるLMT50m鏡に搭載した。この装置は、サブミリ波銀河と呼ばれる宇宙初期に存在する爆発的星形成銀河を一酸化分子(CO)輝線で観測することにより、その銀河の距離や巨大ブラックホールの形成を調べることを目標としている。この装置を用いた近傍星形成領域や宇宙初期の爆発的星形成銀河の試験観測にも成功した。これにより、単一鏡として世界最高性能の2mm観測システムの構築を実現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

波長2mmでの世界最高性能の観測装置を実現できたことにより、未だ未解明の初期宇宙での爆発的星形成の形成進化や巨大ブラックホールの形成の謎、そして巨大ブラックホールの活動が銀河形成に与える影響を調べる新しい手段を提供する。これは、学術的に大きな意味がある。また、この観測システムは、近傍宇宙に存在する巨大ブラックホールを持つ爆発的星形成銀河の観測的な研究にも役立てることが出来る。昨今、巨大ブラックホールの画像が取得され、国民は巨大ブラックホールやその形成等に大きな興味を持っている。この装置で、近傍や遠方宇宙での巨大ブラックホールが引き起こす様々な現象を捉えることで、国民の疑問に答えることが出来る。

研究成果の概要(英文)：We developed a single beam and dual polarization 2-mm receiver system for the 50-m LMT (Large Millimeter Telescope) at an altitude of 4600 m in Mexico. The major science goals are 1) to determine unambiguous spectral redshift (spec-z) of submillimeter galaxies (SMGs), i.e., dusty starburst galaxies in the early universe, by detecting multiple Carbon Mono-Oxide (CO) lines together with existing 3mm receiver on the LMT, 2) to uncover heavily-obscured accreting super-massive black holes (SMBH) in the early universe. The receiver and spectrometer have been successfully installed on the LMT and it was confirmed that the most sensitive single dish observing system at 2mm has been demonstrated via observations of nearby star forming regions such and also very distant galaxies in CO lines. Our 2mm receiver system will be operated as one of LMT observatory instruments from next observing season, and we will start survey observations of high-z source

研究分野：電波天文学

キーワード：ミリ波サブミリ波 爆発的星形成 巨大ブラックホール 一酸化炭素分子 超伝導受信機

1. 研究開始当初の背景

宇宙における星形成の理解は、星で生成される元素・物質の変遷ばかりでなく、星形成を支配する要因の一つである暗黒物質を理解する上でも重要である。すばる望遠鏡やハッブル宇宙望遠鏡などによる可視光から近赤外線に至る波長域(静止系紫外線)での観測が進歩し、今や銀河の研究は赤方偏移 10 に及ぶ時代となった。一方、Herschel 衛星などの遠赤外線の観測から、静止系紫外線での観測は宇宙星形成の一部のみをトレースし、時代に遡るにつれて、ダストに覆い隠されていた星形成活動が急激に増えていることも明らかになってきた(文献 1)。赤方偏移 2 より先の時代でのダストに隠された星形成活動をいかに明らかにするかが大きな課題となっている。

ダストに覆われた星生成銀河の中で、巨大ブラックホール(SMBH)がいかに形成され進化しているかを明らかにすることも、大きな課題である。近年の多波長観測から、赤方偏移が 7.08 という初期宇宙にクエーサーが発見され大きな話題となっている。推定される SMBH の質量は、 2×10^9 太陽質量に及ぶ(文献 2)。宇宙開闢からわずか 7 億年足らずというこの時代に SMBH が存在することは、SMBH 形成理論に対する重大な挑戦となっている。また、初期宇宙のクエーサーの多くが、多量のダストを持ち、爆発的星生成銀河(サブミリ波銀河)と同様に、激しい星生成を行っていることも明らかになってきた。赤方偏移 7.08 のクエーサーでは、既に膨大なダストが存在している(文献 3)。これだけの膨大なダストがどのように作られたかは、大きな謎(“dust budget crisis”, 文献 4)となっている。

我々は、これまでに初期宇宙においてダストに隠された爆発的星形成銀河を探索する上で決定打となるミリ波サブミリ波帯での広域・高感度な観測を大規模に推進してきた(平成 20 年度~24 年度、特別推進研究)。また、Herschel 衛星などのデータの解析も進めてきた。その結果、従来の理論的予測を越えて、赤方偏移 4 あるいはそれ以上という初期の宇宙に、サブミリ波銀河が、多数存在するらしいという事実が明らかになりつつある。また、こうしたサブミリ波銀河の中には、ダストに深く隠された活動銀河核が存在し、原始クエーサーと呼ぶべきものが存在すること、SMBH 形成が原始銀河団形成ともリンクしている可能性があること(文献 5-7)なども分かってきた。このような研究の多くは、測光赤方偏移に依存しており、大きな不定性が内在する。重力レンズを受けた明るいサブミリ波銀河については、ALMA による分光赤方偏移の測定から(文献 8)、赤方偏移 3 を超える銀河が同定されてきたが、個数はまだ多くない。

2. 研究の目的

我々は、波長 3mm 帯で赤方偏移した CO 輝線を多数のサンプルで無バイアスに探査し、ダストに覆われて可視光や近赤外線での分光が難しい銀河での分光赤方偏移を測定すべく、野辺山 45m 鏡に高感度な超広帯域分光観測装置を開発、設置し、成果を挙げて来た(特別推進研究; 文献 9)。ただし、赤方偏移の決定には 2 本以上の遷移を検出することが必須である。本研究では、3 ミリ帯に並ぶもう一つの大気の窓である 2 ミリ帯での世界最高感度な分光観測を行うことを目的にする。検出される輝線が増え、ほとんどの赤方偏移に対して、分光赤方偏移を確定させることができる。一方、CO(J=8→7)や CO(J=9→8)など量子数の高い CO 輝線が、クエーサーでは(通常の星生成銀河と比較して)顕著に強いこと、また、サブミリ波銀河の中にも、こうした量子数の高い CO 輝線が強いものが発見されはじめており、こうした観測的特徴に基づいて、ダストに深く覆われたサブミリ波銀河の中に潜む原始クエーサー的な活動性の探査を目指す。

3. 研究の方法

日本が ALMA に提供したバンド 4 受信機の波長 2 ミリ帯は、大気透過率が良く、分子輝線観測の要求も極めて高いが、その波長帯の観測が出来る単一望遠鏡に乏しい。ここで、メキシコで運用を開始した「Large Millimeter Telescope (LMT)」と日本のバンド 4 受信機技術を組み合わせ、単一鏡としては世界最高感度の 2 ミリ波観測チャンネルの開拓を提案する。これを既存の 3 ミリ帯受信機と組み合わせ、これまで困難だった「ダストに覆われた爆発的星生成銀河(サブミリ波銀河)の赤方偏移(z)の分光同定」を可能とし、現在サンプル数が極めて乏しい $z > 5$ の銀河の検出を目指す。また高回転量子数の CO 輝線の観測を通して、ダストに埋もれた原始クエーサーの候補を探査する。ここで見いだされた高赤方偏移サブミリ波銀河は、ALMA の詳細観測で、力学質量や金属量などを調べる。

4. 研究成果

- (1) **B4R 受信機の開発、性能評価** : 受信機は、ALMA バンド 4 受信機をベースに新たに設計製作し、4KGM 冷凍機システムに組み込んだ。日本国内の評価試験では、当初の目標の性能(受信機雑音温度 50 K 以下)を達成した。また、LMT の既設の光学系(主鏡から #4 鏡)に結合させるための常温光学系(ミラー #5 から #7)を設計しチョッパー較正系やミラーサポートと共に製作した。
- (2) **分光計の開発、性能評価** : 分光計は、2.5 GHz を 32,768ch に分光可能な XFITS ボード(FPGA ベース)を 4 枚導入し、受信機

からの2偏波・両サイドバンドで4中間周波出力について計10GHz分を分光できるシステムを開発した(計13万chを取得可能で、30-50mクラスの単一鏡では世界最大クラスの分光計を実現)。日本国内での試験では、受信機と組み合わせた模擬観測試験、長期データ取得などを行い、設計通りの性能を確認した(以後、受信機と分光計のシステムを合わせてB4Rと呼ぶ)。

(3) **周波数変調局部発信源(FMLO)の開発、実装**：ミリ波サブミリ波単一鏡分光観測の高効率化のため、周波数変調局部発振器(FMLO)による新たな観測手法の開発を行った。これは、連続波カメラ観測で用いられている相関雑音除去手法を分光観測に応用したもので、極めて高い観測効率(>90%)を達成するものである。これまでに、野辺山45m望遠鏡(波長3mm)、ASTE望遠鏡(波長1mm)に観測システムを搭載し、従来のスイッチング観測に対して3倍の観測効率を達成できることを実証した(文献10; Taniguchi et al. 2019 in prep: 図4)。また、同システムは2018年度にLMT望遠鏡(波長2mm)に搭載され、動作確認と試験観測が行われた。今後は、本観測で利用する予定である。

(4) **アンテナへの搭載と、性能評価**：2018年3月にLMTへの搭載と、最初の試験観測を実施した(図1)。また、同年6月、10月にもB4R全体の性能試験や試験観測を実施した。その結果、ポジションスイッチによる赤方偏移 $z=2.64$ の銀河でCO(5-4)の観測に成功し、高感度性能を実証できた(図2)。単一鏡としては2ミリ波帯の世界最高感度の観測システムを実現した。今回LMTの鏡面精度の追いつきがまだ十分でなかったため、アンテナの開口効率も観測時30%程度であり、今後さらに感度改善が期待できる。また、オンザフライマッピング(OTF)法による星形成領域であるオリオン星雲の観測にも成功し、LMT鏡を用いた初の輝線OTF広域イメージングにも成功した(図3)。初期宇宙の研究だけでなく、広く星形成領域の様々な分子輝線観測等にも利用できることを実証した。試験観測で取得されたオリオン星雲の様々な分子輝線のOTFイメージは、これまでになく、高品質、高感度であり、メキシコの研究者が中心となって論文化を行う予定である。

5) **本観測の実施中止と、今後の課題など**：2018年6月、10月の試験観測の成功を受けて、2019年の本格的観測シーズンの2月3日に本観測を実施する予定であったが、LMTサイト近郊で発生したカージャック事件などにより、LMTの運用が一時的に停止された(文献11)。我々もLMTサイトへの渡航を急遽取りやめ、観測等も中止せざる終えない状況となった。6月現在は、地元警察等の協力を得て、運用が再開されたとLMT所長から報告を受けている。これから雨季に入るため、雨季後の本年11月以降に本観測を実行する方針であり、LMT側と本観測の調整に入った。また、2018年10月に取得した試験観測データの詳細解析から、観測システムの改良点が浮かび上がってきた。特に、受信機の強度校正精度や、ベースライン安定性などである。それらの改善策は、既に検討済みであり、次回の本観測前に装置に改良を施す計画である。

6) **LMTグループとの協力体制など**：B4Rの性能評価・試験観測結果の英文レポートをLMT運用グループに提出した。試験観測の結果はLMTグループに高く評価され、LMT所長のDavid Huges氏は国際会議等でも紹介を行った。B4Rは、LMT観測所の正式な観測装置としてB4Rを受け入れる方向で議論が進んでおり、開発・製造者である我々B4Rチームは、B4Rを使った観測的研究を提案する権利が与えられることとなる。今後はそのような枠組みを使って継続的に観測を推進するとともに、メキシコや米国マサチューセッツ大学などの研究グループと初期宇宙などの共同研究を実施してゆく予定である。また、試験観測データの論文化も共同で進める予定である。

図1. 4600mの山頂に設置されたLMT50m鏡(上段)と、2018年3月にLMT受信機室に搭載されたB4R受信機(下段)。分光計システムは、1階下のバックエンド室に設置された



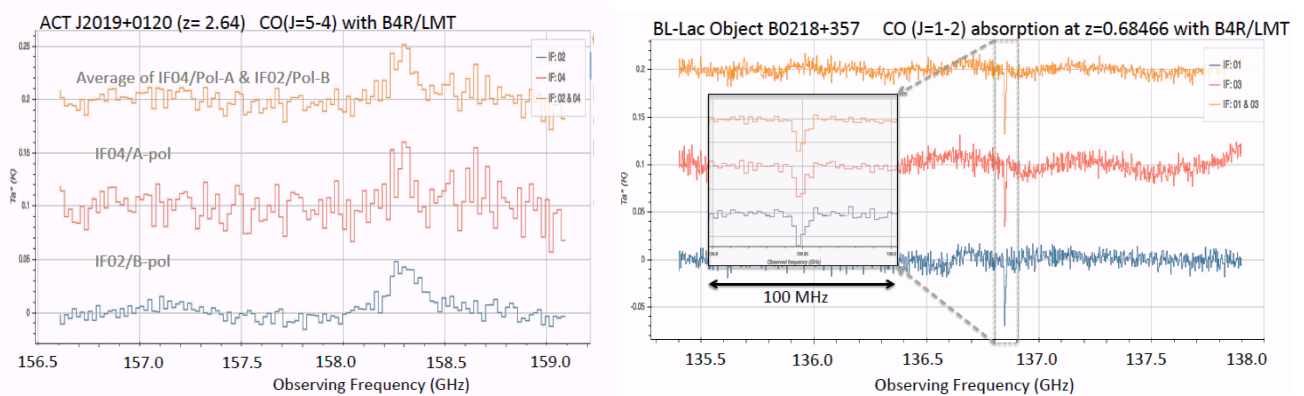


図 2. (左図) LMT に搭載した B4R 受信機で 2018 年 10 月に観測した、ACT J2019+0120 ($z=2.64$) で検出した CO(J=5-4) 輝線(独立な 2 偏波の信号を単純平均した結果が最上段)。観測時間(天体方向)およそ 15 分でも、1000 km/s に広がった CO 輝線を十分な S/N 比で検出に成功した。(右図) 遠方の連続波源である BL-LAC 天体 B0218+357 を背景にした、CO の吸収線系の観測結果。細い線幅(10-20 km/s)の吸収線系に対しても十分な S/N で CO(J=1-2) の検出に成功。安定した pointing 性能と高い観測感度を要求する吸収線系の観測においても、B4R 受信機と分光計の性能実証ができた。

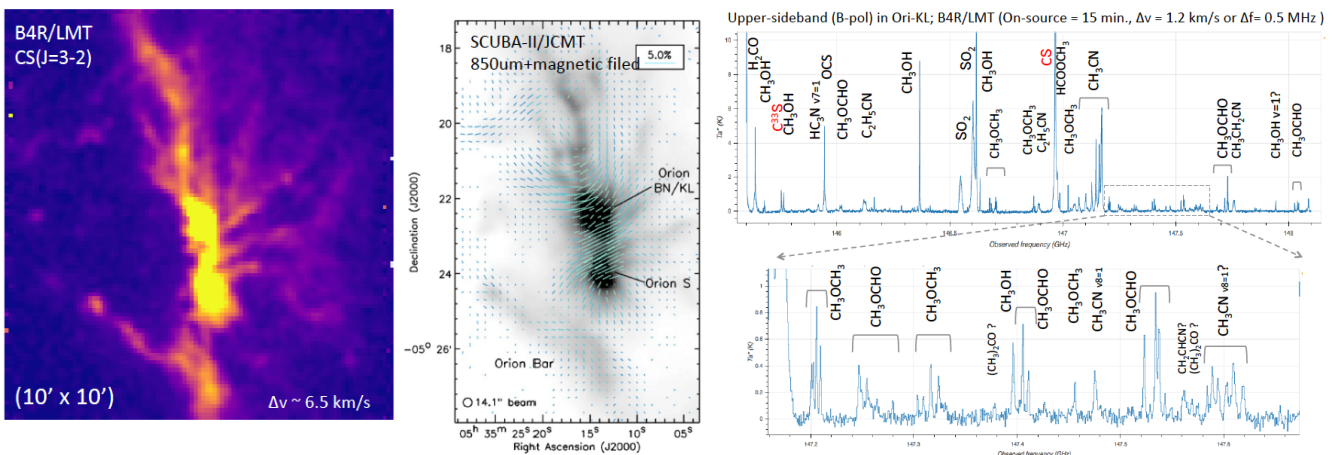


図 3. (左図) B4R 受信機によるオンザフライ・マッピング(On-The-Fly:OTF)法によって得られたオリオン星雲方向の一硫化炭素 CS(J=3-2)輝線広域イメージ(10 分角領域をおよそ 10" 空間分解能でイメージング)。LMT 鏡を用いた初のスペクトル線 OTF イメージを、B4R 受信機で取得。メインなフィラアメン構造とそれに垂直なストライエーション構造を鮮明に捉えた(中央図の、塵の構造ともよく一致)。それ以外の分子も同時に多数検出された(右図)。メキシコの研究者が中心になって論文化を図る計画である。

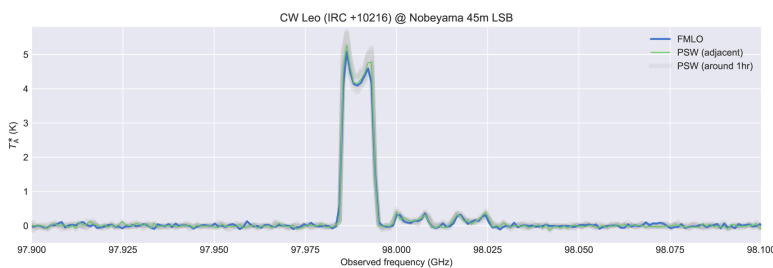


図 4. 45m 鏡での FMO の実証実験で得られた炭素星 CW-LEO (IRC+10216) 方向の CS(2-1) スペクトル。同様の FMO システムは、2018 年 6 月に LMT に搭載され、2018 年 10 月の試験観測で、正常に動作することを確認した。

[引用文献] 1. Burgarella et al. 2013, A&A, 554, 70. 2. Page et al. 2014, MNRAS, 440, L91. 3. Venemans et al. 2012, ApJ, 751, L25 4. Rowlands et al. 2014, MNRAS, 441, 1040. 5. Tamura et al. 2009, Nature, 459, 61. 6. Tamura et al. 2010, ApJ, 724, 1270 7. Umehata et al. 2014, MNRAS, 440, 3462 8. Viera et al. 2013, Nature, 495, 344 9. Iono et al. 2012, PASJ, 64, 2 10. Taniguchi, A. 博士論文 (東京大学), 2017年3月 11. Nature 566, 03-304 (2019)

5. 主な発表論文

[雑誌論文] (計6件)

1. Tamura, Y. et al., “Detection of the Far-infrared [OIII] and Dust Emission in a Galaxy at redshift 8.312: Early Metal Enrichment in the Heart of the Reionization Era”, ApJ (査読有), 874, p27, 2019 (DOI: 10.3847/1538-4357/ab0374)
2. Tadaki, K., (中略), Kawabe, R., (中略) Tamura, Y. et al., “The gravitationally unstable gas disk of a starburst galaxy 12 billion years ago”, Nature (査読有), 560, p613, 2018 (DOI: 10.1038/s41586-018-0443-1)
3. Toba, Y., Ueda, J., (中略), Kawabe, R., “Discovery of an Extremely Luminous Dust-obscured Galaxy Observed with SDSS, WISE, JCMT, and SMA”, ApJ (査読有), 857, p31, 2018 (DOI: 10.3847/1538-4357/aab3cf)
4. Lee, M., (中略), and Kawabe, R., “A Radio-to-mm Census of Star-forming Galaxies in Protocluster 4C23.56 at $z=2.5$: Gas Mass and Its Fraction Revealed with ALMA”, ApJ (査読有), 842, p55, 2017 (DOI: 10.3847/1538-4357/aa74c2)
5. Ikarashi, S., (中略), Kawabe, R., (中略) Tamura, Y. et al., “Extremely Red Submillimeter Galaxies: New $z > 4-6$ Candidates Discovered using ALMA and Jansky VLA”, ApJ (査読有), 835, p286, 2017 (DOI: 10.3847/1538-4357/835/2/286)
6. Tamura, Y. et al., “Extremely Bright Submillimeter Galaxies beyond the Lupus-I Star-forming Regions”, ApJ (査読有), 808, p121, 2015 (DOI: 10.1088/0004-437X/808/2/121)

[学会発表] (計12件)

1. Kawabe, R. et al., B4R on LMT and Future Upgrade, Submillimeter Astronomy Workshop, Nanjing, China, 2019
2. Tamura, Y., High- z Cosmology via CO/[CII]/[OIII] Tomography with LST, Submillimeter Astronomy Workshop, Nanjing, China, 2019
3. 酒井剛他, LMT50m 鏡用 2 ミリ波受信機システムの開発と爆発的星形成銀河、ブラックホールの研究 IV: 搭載試験観測、日本天文学会春季年会、2019
4. Kawabe, R. et al., B4R and Future Plan, Guillermo Haro 2018 Workshop: Synergy between GTC and GMT/LMT, Puebla, Mexico, 2018
5. Hatsukade, B. et al., “New 2mm (Band-4) Receiver (B4R) for LMT”, Guillermo Haro 2018 Workshop: Synergy between GTC and GMT/LMT, Puebla, Mexico, 2018
6. 川邊良平他, LMT50m 鏡用 2 ミリ波受信機システムの開発と爆発的星形成銀河、ブラックホールの研究 III: 搭載計画、日本天文学会春季年会、2018
7. 川邊良平他, LMT50m 鏡用 2 ミリ波受信機システムの開発と爆発的星形成銀河、ブラックホールの研究 II: 全体進捗、日本天文学会春季年会、2017
8. 酒井剛他, LMT50m 鏡用 2 ミリ波受信機システムの開発と爆発的星形成銀河、ブラックホールの研究 III、開発進捗、日本天文学会春季年会、2017
9. 谷口暁星、田村陽一他, FMLO: 周波数変調局発振器による新しいミリ波サブミリ波分光法: V. ASTE への FMLO システムの搭載・試験観測、日本天文学会春季年会、2017
10. 谷口暁星、田村陽一他, ミリ波サブミリ波で探る遠方宇宙-電波望遠鏡の信号処理開発、電子情報通信学会 信号処理研究

会、2017

11. Taniguchi, A., A New HD3 Spectroscopic Method for Radio Astronomy with Removing Correlated Noises, International Meeting on High-Dimensional Data Driven Science, Kyoto, Japan, 2015
12. 川邊良平他、LMT50m 鏡用 2 ミリ波受信機システムの開発と爆発的星形成銀河、ブラックホールの研究、日本天文学会秋季年会、2015

6. 研究組織

(1) 研究分担者

1. 研究分担者氏名・所属機関名: 田村 陽一 (TAMURA yoichi) ・名古屋大学
部局名・職名: 理学研究科・准教授 (研究者番号: 10608764)
2. 研究分担者氏名・所属機関名: 酒井 剛 (SAKAI takeshi) ・電気通信大学
部局名・職名: 情報理工学研究科・准教授 (研究者番号: 20469604)
3. 研究分担者氏名・所属機関名: 田中 邦彦 (TANAKA kunihiko) ・慶應大学
部局名・職名: 理工学部(矢上)・助教 (研究者番号: 00534562)

(2) 研究協力者

1. 研究協力者氏名・所属機関名: 河野 孝太郎 (KOHNO kotaro) ・東京大学
部局名・職名: 理学研究科・教授 (研究者番号: 80321587)
2. 研究協力者氏名・所属機関名: 大島 泰 (OSHIMA tai) ・国立天文台
部局名・職名: 先端技術センター・助教 (研究者番号: 40450184)
3. 研究協力者氏名・所属機関名: 谷口 暁星 (TANIGUCHI akio) ・名古屋大学
部局名・職名: 理学研究科・研究員
4. 研究協力者氏名・所属機関名: HUDGES david ・ INAOE (Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, メキシコ)
部局名・職名: Large Millimeter Telescope ・ Director